

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international(43) Date de la publication internationale
6 novembre 2003 (06.11.2003)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 03/091755 A2

- (51) Classification internationale des brevets⁷ : G02B
- (21) Numéro de la demande internationale : PCT/FR03/01292
- (22) Date de dépôt international : 23 avril 2003 (23.04.2003)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité : 02/05171 24 avril 2002 (24.04.2002) FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : OPTO-GONE [FR/FR]; Technopôle Brest-Iroise, 305, rue Claude Shannon, F-29280 Plouzane (FR).

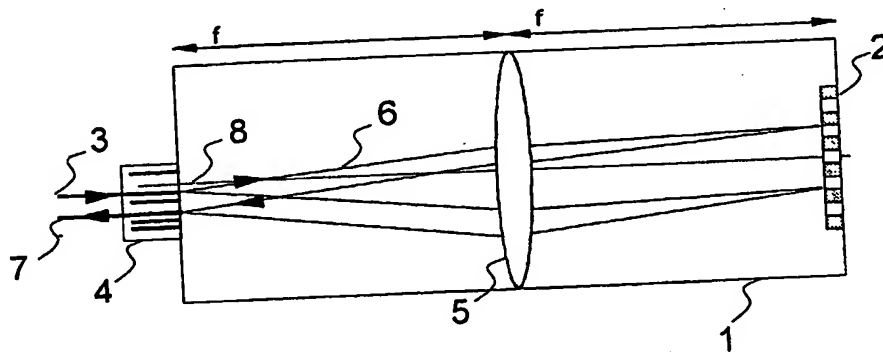
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : DE BOUGRENET DE LA TOCNAÏE, Jean-Louis [FR/FR]; 35bis, Route de Milizac, F-29820 Guilers (FR). FRACASSO, Bruno [FR/FR]; Langoulouman, F-29810 Plouarzel (FR). RAZZAK, Mustapha [FR/FR]; 4, rue de la Frégate, La Boussole, F-29200 Brest (FR).
- (74) Mandataire : VIDON, Patrice; Le Nobel, 2, allée Antoine Becquerel, B.P. 90333, F-35703 Rennes Cedex 7 (FR).

- (81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: OPTICAL FILTER DEVICE EMPLOYING A PROGRAMMABLE DIFFRACTIVE ELEMENT AND THE CORRESPONDING SPATIAL SPECTRAL BAND ROUTER AND CHROMATIC DISPERSION COMPENSATION DEVICE

(54) Titre : DISPOSITIF OPTIQUE DE FILTRAGE METTANT EN ŒUVRE UN ÉLÉMENT DIFFRACTIF PROGRAMMABLE, ROUTEUR SPATIAL DE BANDES SPECTRALES ET DISPOSITIF DE COMPENSATION DE DISPERSION CHROMATIQUE CORRESPONDANTS.



WO 03/091755 A2 (57) Abstract: The invention relates to an optical filter device comprising at least one input optical fibre and at least one output optical fibre. According to the invention, one such device comprises means of transferring at least one spectral band with at least one signal with multiple incident wavelengths to at least one of the aforementioned output optical fibres by means of at least one of said input optical fibres. The above-mentioned transfer means employ at least one programmable diffractive element which is located on an optical path between the input optical fibre(s) and the output optical fibre(s). The invention also relates to a spectral band router and a chromatic dispersion compensation device employing one such filter device.

(57) Abrégé : L'invention concerne un dispositif optique de filtrage comprenant au moins une fibre optique d'entrée et au moins une fibre optique de sortie. Selon l'invention, un tel dispositif comprend des moyens de transfert, vers au moins une desdites fibres optiques de sortie, d'au moins une bande spectrale d'au moins un signal à multiples longueurs d'onde incident par au moins une desdites fibres optiques d'entrée, lesdits moyens de transfert mettant en œuvre au moins un élément diffractif programmable situé sur un chemin optique entre

[Suite sur la page suivante]



MZ, NI, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

- (84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

la ou lesdites fibres optiques d'entrée et la ou lesdites fibres optiques de sortie. L'invention concerne également un rouleur de bandes spectrales et un dispositif de compensation de dispersion chromatique mettant en œuvre un tel dispositif de filtrage.

Dispositif optique de filtrage mettant en œuvre un élément diffractif programmable, routeur spatial de bandes spectrales et dispositif de compensation de dispersion chromatique correspondants.

Le domaine de l'invention est celui des télécommunications par fibres optiques. Plus précisément, l'invention concerne une technique de réalisation de
5 filtres optiques accordables, notamment utilisés dans la conception de dispositifs de routage de bandes spectrales et de compensation de dispersion chromatique.

Les fonctions de routage de bandes spectrales et de compensation de dispersion chromatique revêtent une importance particulière dans la mise en
10 œuvre de réseaux de communication optiques de nouvelle génération.

Ainsi, par exemple, le routage de bandes spectrales est indispensable pour partager une source à multiples longueurs d'ondes entre le "hub office" (en français, "concentrateur" ou "multi-répéteur") d'un prestataire de services et un fournisseur de contenu, ainsi que décrit dans l'article de C. F. Lam et al. intitulé
15 "Programmable optical multicasting in a region : metro area network using a wavelength selective optical cross-connect" (en français "Diffusion sélective optique programmable dans une région : réseau métropolitain mettant en œuvre un dispositif de connexion optique sélectif en longueur d'ondes"), Proc. ECOC 01 Amsterdam, Octobre 2001, pages 614-615.

On connaît à ce jour plusieurs techniques de routage de bandes spectrales, et notamment celle proposée dans l'article de J. K. Rhee et al. intitulé "Variable pass-band optical add-drop multiplexer using wavelength selective switch" (en français "multiplexeur d'insertion-extraction optique passe-bande variable, mettant en œuvre un commutateur sélectif en longueur d'onde"), Proc. ECOC 01
20 Amsterdam, Octobre 2001, pages 550-551. Cette solution, proposée pour implanter des commutateurs sélectifs en longueur d'onde ou des multiplexeurs d'insertion-extraction à bandes spectrales variables, repose sur une configuration d'optique en espace libre, mettant en œuvre des modulateurs spatiaux à cristal liquide.

Cette solution permet la réalisation de filtres à profil plat sur une large bande spectrale et un filtrage continu entre canaux adjacents. Les canaux sont tout d'abord démultiplexés grâce à une optique diffractive fixe, puis imagés sur un modulateur spatial de lumière (MSL), qui joue le rôle de filtre spatial de longueurs d'onde. La largeur et la sélectivité du canal sont déterminées par le nombre de pixels ou groupes de pixels activés. Les différents canaux sont ensuite recombinaés par processus inverse.

Cette solution a pour inconvénient de nécessiter la mise en œuvre de deux éléments optiques distincts, à savoir tout d'abord une optique diffractive fixe réalisant une opération de démultiplexage, puis un modulateur spatial de lumière, qui réalise une opération de filtrage spatial.

Le dispositif de routage conçu selon une telle technique est donc peu compact. En outre, l'utilisation de plusieurs éléments optiques distincts tend à accroître les pertes affectant le signal lumineux, et donc à diminuer le rendement global du dispositif de routage ainsi réalisé.

Un autre inconvénient de ce dispositif est qu'il ne permet pas de régler avec précision la largeur et la sélectivité spectrale des différents canaux.

Comme la fonction de routage, la compensation de dispersion chromatique est une fonctionnalité très importante des réseaux de communication optiques de nouvelle génération, notamment lorsque les débits de transmission envisagés sont supérieurs à 10Gbits/s, ainsi qu'exposé par V. Srikant dans "Broadband dispersion and dispersion slope compensation in high bit rate and ultra haul system" (en français "Dispersion large bande, et compensation de la pente de dispersion dans un système à haut débit très longue distance"), OFC 2001, TuH1-1.

On rappelle que le problème de la dispersion chromatique résulte du fait que chaque impulsion lumineuse comprend de multiples longueurs d'ondes, chacune de ces longueurs d'ondes présentant des caractéristiques de propagation différentes dans le milieu considéré.

On connaît déjà plusieurs techniques de compensation de dispersion chromatique, qui reposent, pour certaines, sur l'utilisation de fibres à

compensation négative, pour d'autres, sur des techniques basées sur l'excitation de modes de propagation d'ordres supérieurs (en anglais "High order modes"). On connaît également plusieurs techniques mettant en œuvre des fibres à base de réseaux de Bragg modulés (en anglais "chirped Bragg gratings"), ainsi que, plus
5 récemment, des solutions utilisant une configuration en espace libre du type VIPA (marque déposée).

Un inconvénient de ces différentes techniques de compensation de dispersion chromatique, qui s'appliquent principalement aux réseaux de transport, est qu'elles ne sont pas adaptatives : en d'autres termes, elles ne peuvent pas être
10 appliquées à des bandes spectrales présentant des dispersions chromatiques variables.

Il apparaît donc nécessaire, tant dans le domaine du routage de bandes spectrales que dans celui de la compensation de dispersion chromatique, de concevoir une technique de sélection adaptative de bandes spectrales variables.

15 L'invention a notamment pour objectif de satisfaire ce besoin et de pallier les différents inconvénients des techniques de l'art antérieur.

Plus précisément, un objectif de l'invention est de fournir une technique de sélection de bandes spectrales variables et de filtrage de bande spectrale accordable en longueur d'onde.

20 L'invention a encore pour objectif de fournir une telle technique qui puisse être avantageusement utilisée pour la conception de dispositifs de routage de bandes spectrales et/ou de compensation de dispersion chromatique.

L'invention a également pour objectif de proposer une telle technique de routage mettant en œuvre un nombre d'éléments optiques réduit par rapport aux
25 techniques de l'art antérieur.

Encore un objectif de l'invention est de fournir une technique de compensation de dispersion chromatique adaptative, qui puisse être appliquée à des bandes spectrales de dispersions chromatiques variables.

Ces objectifs, ainsi que d'autres qui apparaîtront par la suite, sont atteints à l'aide d'un dispositif optique de filtrage comprenant au moins une fibre optique d'entrée et au moins une fibre optique de sortie.

Selon l'invention, un tel dispositif comprend des moyens de transfert, vers
5 au moins une desdites fibres optiques de sortie, d'au moins une bande spectrale d'au moins un signal à multiples longueurs d'onde incident par au moins une desdites fibres optiques d'entrée, lesdits moyens de transfert mettant en œuvre au moins un élément diffractif programmable situé dans un plan intermédiaire entre la ou lesdites fibres optiques d'entrée et la ou lesdites fibres optiques de sortie.

10 Ainsi, l'invention propose une approche tout à fait nouvelle et inventive de sélection et de filtrage de bandes spectrales. En effet, l'invention repose notamment sur l'exploitation des caractéristiques de dépendance chromatique d'un élément diffractif programmable. Elle permet donc avantageusement de sélectionner une bande spectrale quelconque, centrée sur une longueur d'onde λ_i
15 quelconque d'un signal incident à multiples longueurs d'ondes, et de la transférer vers une fibre optique de sortie quelconque du dispositif de filtrage ainsi constitué, par programmation adéquate de l'élément diffractif programmable.

L'invention permet donc, contrairement aux techniques de l'art antérieur, de réaliser une sélection adaptative de bandes spectrales variables en largeur et en
20 longueur d'onde, permettant la conception d'un filtre de bande spectrale accordable en longueur d'onde. Le dispositif de filtrage de l'invention présente en outre l'avantage, par rapport aux techniques connues de l'art antérieur, d'être compact et simple, puisqu'il ne nécessite la mise en œuvre que d'un élément optique, à savoir un élément diffractif programmable. L'utilisation d'un tel
25 dispositif est particulièrement souple et adaptable en fonction des caractéristiques du signal incident et du filtrage que l'on souhaite réaliser.

Avantageusement, un tel dispositif comprend des moyens de programmation permettant de modifier, dans au moins une direction, la période spatiale d'un motif dudit élément diffractif programmable.

Préférentiellement, lesdits moyens de programmation permettent de configurer ledit élément diffractif programmable de façon qu'il présente une période spatiale P dans ladite au moins une direction, de sorte qu'une bande spectrale centrée sur une longueur d'onde λ_i donnée soit diffractée dans ladite au moins une direction par ledit élément diffractif programmable selon un angle θ_i prédéterminé tel que $\sin\theta_i = \frac{k\lambda_i}{P}$, où k est un nombre entier.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, lesdits moyens de programmation apportent à ladite période spatiale P une perturbation équivalente à une variation inférieure à la taille d'un pixel dudit élément diffractif programmable.

On peut ainsi obtenir une variation infinitésimale de la période du réseau.

Selon un mode de réalisation avantageux de l'invention, lesdits moyens de programmation permettent de configurer ledit élément diffractif programmable de façon qu'il présente une période spatiale P comprenant :

- au moins une sous-période comprenant N_1 pixels ;
 - au moins une sous-période comprenant N_2 pixels,
- où N_1 et N_2 sont deux nombres entiers distincts.

Préférentiellement, un tel dispositif comprend une matrice d'au moins deux fibres optiques de sortie constituant chacune un filtre-spectral.

Avantageusement, la localisation dans l'espace desdites fibres optiques de sortie est prédéterminée en fonction d'une fonction de filtrage à réaliser.

La disposition des fibres optiques au sein de la matrice de sortie n'est donc pas quelconque ; elle est de préférence non régulière. Les fibres de sortie constituent ainsi un filtre physique des signaux renvoyés par l'élément diffractif programmable.

De façon avantageuse, la taille du cœur desdites fibres optiques de sortie est prédéterminée en fonction d'une fonction de filtrage à réaliser.

En effet, la taille du cœur des fibres de sortie conditionne également la bande passante du filtre spectral qu'elles réalisent.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, lesdites fibres optiques de sortie sont situées sur au moins un cercle d'isochromatisme.

Selon une première variante de réalisation avantageuse de l'invention, ledit élément diffractif est un hologramme numérique programmable.

5 Avantageusement, ledit hologramme numérique programmable est affiché sur un modulateur spatial de lumière à niveaux de modulation d'amplitude ou de phase, lesdits niveaux étant continus ou quantifiés.

De façon préférentielle, ledit modulateur spatial de lumière peut être associé à au moins un élément diffractif fixe.

10 Selon un premier mode de réalisation avantageux de l'invention, un tel dispositif comprend une lentille collimatrice, ledit élément diffractif agit en réflexion et est situé dans le plan focal image de ladite lentille collimatrice, et lesdites au moins une fibre optique d'entrée et de sortie sont situées dans le plan focal objet de ladite lentille collimatrice, de façon à former un montage d'optique
15 en espace libre de type 4-f replié.

 Selon un deuxième mode de réalisation avantageux de l'invention, un tel dispositif comprend deux lentilles collimatrices, appelées respectivement première et deuxième lentilles, ledit élément diffractif est situé dans le plan focal image de ladite première lentille et dans le plan focal objet de ladite deuxième lentille,
20 ladite au moins une fibre optique d'entrée est située dans le plan focal objet de ladite première lentille, et ladite au moins une fibre optique de sortie est située dans le plan focal image de ladite deuxième lentille, de façon à former un montage d'optique en espace libre de type 4-f.

 Avantageusement, un tel dispositif comprend une matrice d'au moins deux
25 fibres optiques de sortie, chacune desdites fibres étant caractérisée par sa position par rapport à l'axe optique dudit dispositif, de façon que ledit dispositif constitue une batterie d'au moins deux filtres accordables, et il comprend des moyens d'ajustement holographiques de la sélectivité spectrale de chacun desdits filtres, en fonction de ladite position par rapport à l'axe optique de ladite fibre optique de
30 sortie correspondante.

De façon avantageuse, lesdites fibres optiques de sortie sont des fibres monomodes.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, au moins une desdites fibres monomodes présente au moins une lentille en son extrémité, de façon à former une fibre monomode lentillée.

Préférentiellement, ladite lentille comprend au moins un tronçon de fibre à gradient d'indice rapporté par assemblage et fracture.

De manière préférentielle, ladite lentille comprend en outre un tronçon de fibre en silice entre ladite fibre monomode et ledit tronçon de fibre à gradient d'indice rapporté par assemblage et fracture.

Avantageusement, un tel dispositif comprend des moyens de réglage d'un gabarit de filtrage appliqué à au moins une desdites longueurs d'onde.

De façon avantageuse, ledit gabarit de filtrage est superposé audit élément diffractif programmable.

Ainsi, une fonction de fenêtrage est superposée à l'élément diffractif. L'action d'une telle fonction de fenêtrage est un désaccord spatial du mode incident sur la fibre, se répercutant sur la sélectivité en longueur d'onde de cette dernière.

Selon une variante avantageuse, ledit gabarit de filtrage est inclus dans ledit élément diffractif programmable.

La fenêtre correctrice fait alors partie de l'hologramme numérique.

L'invention concerne également un routeur de bandes spectrales comprenant au moins un dispositif optique tel que décrit précédemment, le ou lesdits dispositifs comprenant au moins deux fibres optiques de sortie.

Préférentiellement, dans un tel routeur de bandes spectrales selon l'invention, ledit élément diffractif est configurable dynamiquement de façon à router au moins deux bandes spectrales distinctes d'au moins un signal incident, respectivement vers des fibres optiques de sortie F_j distinctes.

Avantageusement, lesdits moyens de programmation permettent de configurer ledit élément diffractif programmable, de façon que ledit élément

5 diffractif programmable présente, dans ladite au moins une direction, une période spatiale P correspondant à la combinaison d'une pluralité de périodes spatiales P_i , où chacune desdites périodes spatiales P_i est telle que, lorsque ledit élément diffractif programmable présente ladite période spatiale P_i , une bande spectrale centrée sur λ_i est transférée vers ladite fibre optique de sortie F_j .

De manière préférentielle, lesdites fibres optiques de sortie sont situées sur un cercle d'isochromatisme, de façon que le routage desdites bandes spectrales s'effectue à bande passante constante.

10 L'invention concerne aussi un dispositif de compensation de dispersion chromatique, comprenant un dispositif optique tel que décrit précédemment.

Préférentiellement, au moins une desdites fibres optiques de sortie est connectée à au moins un tronçon de fibre à compensation chromatique négative.

15 Dans un premier mode de réalisation avantageux de l'invention, lesdits tronçons de fibre à compensation chromatique négative présentent une extrémité réfléchissante.

Selon une première variante de réalisation de l'invention, lesdites fibres optiques de sortie sont situées sur un cercle d'isochromatisme.

20 Selon une deuxième variante de réalisation de l'invention, lesdites fibres optiques de sortie sont situées sur au moins deux cercles d'isochromatisme distincts.

Dans un deuxième mode de réalisation avantageux de l'invention, ledit tronçon de fibre optique à compensation chromatique négative est connecté, par une première extrémité, à une première fibre optique de sortie, et, par une deuxième extrémité, à une deuxième fibre optique de sortie.

25 Préférentiellement, lesdites première et deuxième fibres optiques de sortie sont deux fibres diamétralement opposées d'un cercle d'isochromatisme.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation préférentiel, donné à titre de simple exemple illustratif et non limitatif, et des
30 dessins annexés, parmi lesquels :

- la figure 1 présente un synoptique d'un dispositif optique de filtrage selon l'invention, qui peut être appliqué par exemple au routage de bandes spectrales ou à la compensation de dispersion chromatique ;
- la figure 2 illustre des résultats de mesure de la bande passante des différents filtres du dispositif de la figure 1 ;
- la figure 3 présente deux exemples de motifs de l'élément diffractif programmable du dispositif de la figure 1 ;
- la figure 4 illustre l'intensité de couplage dans une fibre optique de sortie du dispositif de l'invention, en fonction de la longueur d'onde, avec les deux exemples de motifs de la figure 3 ;
- la figure 5 illustre la bande passante d'un filtre du dispositif de la figure 1, en fonction du nombre de pixels par période de l'élément diffractif programmable ;
- la figure 6 présente un exemple de positionnement des fibres optiques de sortie par rapport à l'axe optique du dispositif de l'invention ;
- la figure 7 présente un exemple de routage de bandes spectrales à partir du dispositif optique de filtrage de l'invention ;
- les figures 8a et 8b illustrent, sous forme de courbes de résultats, l'opération de routage de la figure 7 ;
- les figures 9 et 10 illustrent une première variante de réalisation d'un dispositif de compensation chromatique de l'invention, comprenant un dispositif optique de filtrage de la figure 1, et mettant en œuvre des tronçons de fibres à compensation négative présentant une extrémité réfléchissante ;
- la figure 11 présente une deuxième variante de réalisation d'un dispositif de compensation chromatique selon l'invention, comprenant un dispositif optique de filtrage de la figure 1, et mettant en œuvre des tronçons de fibres à compensation négative connectées sur deux fibres de sortie d'ordre de diffraction symétrique.

Le principe général de l'invention repose sur la mise en œuvre d'un élément diffractif périodique (du type réseau de phase) ou d'un hologramme numérique mince, utilisé pour la déflexion d'un faisceau lumineux incident, et dont on exploite avantageusement la dépendance chromatique, afin de réaliser un dispositif de filtrage accordable. Il repose également sur l'utilisation d'une
5 matrice de fibres de sortie qui constituent un filtre physique, par la taille de leur cœur, et leurs positions dans l'espace.

On présente, en relation avec la figure 1, un mode de réalisation d'un dispositif optique de filtrage de l'invention, permettant une sélection adaptative de
10 bandes spectrales.

Dans un mode de réalisation préférentiel de l'invention, on utilise un montage d'imagerie par double diffraction 1 (encore appelé montage 4-f) comprenant :

- un hologramme numérique programmable 2 ;
- 15 - une fibre optique d'entrée 3 ;
- une matrice 4 de fibres optiques en sortie ;
- une lentille collimatrice 5.

L'hologramme numérique programmable 2 est situé dans le plan de Fourier (2f), c'est-à-dire dans le plan focal de la lentille collimatrice 5. La matrice 4 de fibres optiques en sortie est disposée dans le plan focal de la lentille collimatrice 5, symétriquement à l'hologramme numérique 2, ainsi que représenté sur la figure
20 1.

Le principe de fonctionnement du montage de la figure 1 consiste à exploiter la dépendance chromatique de l'élément diffractif périodique 2 (qui peut être par exemple un réseau de phase ou un hologramme numérique mince),
25 lorsque celui-ci est utilisé pour la déflexion d'un faisceau incident par la fibre optique d'entrée 3.

En d'autres termes, on considère le signal à multiples longueurs d'ondes 6, incident par la fibre optique d'entrée 3. Ce signal 6 comprend une pluralité de
30 composantes distinctes de longueurs d'ondes respectives λ_i , où i varie de 1 à N. Le

dispositif de la figure 1 permet de sélectionner une bande spectrale quelconque de ce signal 6, centrée par exemple sur une longueur d'onde λ_2 , et de la transférer vers l'une quelconque des fibres optiques de la matrice de sortie 4. Dans l'exemple particulier de la figure 1, on cherche à transférer cette bande spectrale vers la fibre
5 optique de sortie référencée 7.

Dans un mode de réalisation préférentiel de l'invention, on se limite à l'étude des propriétés diffractives de l'hologramme 2 au premier ordre. Toutefois, les ordres supérieurs (bien que moins énergétiques que le premier ordre) peuvent également être utilisés car ils présentent l'avantage d'offrir une plus grande
10 dispersion angulaire. L'adressage d'une fibre de sortie de la matrice 4 s'effectue en imposant l'angle de diffraction de la bande spectrale considérée par l'hologramme 2.

La valeur de cet angle de diffraction est donnée, en fonction de la longueur d'onde centrale de la bande spectrale considérée et de la période spatiale de
15 l'hologramme 2, par la relation des réseaux suivante, valable pour un signal en incidence normale sur l'élément diffractif 2 :

$$P \sin \theta = k \lambda \quad (1)$$

λ , P , θ , et k sont respectivement la longueur d'onde centrale de la bande spectrale sélectionnée, la période spatiale du réseau 2, l'angle et l'ordre de diffraction. On
20 en déduit, par dérivation, la dépendance chromatique du réseau diffractif 2 considéré :

$$\frac{\delta \theta}{\delta \lambda} = \frac{k}{P \cos \theta} \quad (2)$$

$\delta \lambda$ et $\delta \theta$ sont respectivement les dispersions chromatique et angulaire de l'élément diffractif 2. On notera que la dispersion angulaire $\delta \theta$ est plus grande pour les
25 petites périodes spatiales d du réseau 2 (c'est-à-dire pour les grandes fréquences spatiales de l'élément diffractif 2).

Les fibres de sortie de la matrice 4, en fonction de leur ouverture numérique, constituent une pluralité de filtres de bandes spectrales.

Ces fibres 4 peuvent être des fibres mono-modes classiques et/ou des fibres à cœur étendu. Ces aspects seront présentés plus en détail dans la suite du document.

Les fibres de sortie de la matrice 4 sont caractérisées par leur position par rapport à l'axe optique 8 du dispositif de la figure 1. Le taux d'injection d'un signal dans une fibre optique dépend de la relation suivante :

$$T = \left(\frac{2w_r}{w_r^2 + 1} \right)^2 \exp\left(\frac{-2\delta_r^2}{w_r^2 + 1} \right) \quad \text{avec} \quad \delta_r = \frac{\delta}{w_0} \quad (3)$$

où w_r représente la largeur du faisceau incident (ou "waist", en français "col"),
 w_0 représente la largeur du mode de la fibre,
 et δ représente la distance entre le centre du faisceau optique incident et le centre du cœur de la fibre, encore appelé désalignement.

La largeur de la bande passante des différents filtres du dispositif de filtrage de la figure 1 sera donc fonction de la position de la fibre optique de sortie correspondante de la matrice 4, située plus ou moins loin de l'axe optique 8 du système, et de la valeur de δ pour une longueur d'onde donnée. Cette dépendance est illustrée par les résultats expérimentaux de la figure 2, qui montrent que plus la fibre optique de sortie considérée est éloignée de l'axe optique du système ("Out #14"), et plus la bande passante du filtre correspondant est étroite.

Le principe du dispositif de la figure 1 consiste, pour réaliser des filtres accordables en longueur d'onde à partir des fibres optiques de sortie de la matrice 4, à faire défiler le spectre de longueurs d'ondes du signal incident 6 devant la fibre optique de sortie sélectionnée 7.

Compte-tenu de la faible taille du cœur de la fibre de sortie 7 (typiquement de l'ordre de $10 \mu\text{m}$), le dispositif 1 doit autoriser des déplacements sub-microniques du faisceau devant la fibre optique 7, de façon à permettre d'accorder avec précision la bande passante du filtre correspondant.

Ces déplacements sub-microniques sont avantageusement rendus possibles, dans le dispositif 1, par l'utilisation d'un hologramme numérique ou d'un réseau diffractif mince 2. Dans ces conditions, l'angle de déflexion du

faisceau incident est déterminé par la résolution de l'élément diffractif 2, c'est-à-dire par la taille du plus petit élément de l'hologramme ou du réseau 2 ajustable indépendamment. Plus précisément, si p est la taille d'un pixel de l'élément diffractif 2, et en supposant une onde incidente plane, les angles de diffraction θ_i ($i=x,y$ dans la direction des abscisses et des ordonnées) de cette onde sur l'élément diffractif 2 sont donnés par l'équation (1) ci-dessus qui s'exprime sous la forme :

$$\sin \theta_i = \frac{k\lambda}{pN_i} \quad (4)$$

où N_i est le nombre de pixels utilisé par période du réseau dans la dimension i . Dans un mode de réalisation préféré de l'invention, on se limite à l'étude du premier ordre de diffraction en régime paraxial (c'est-à-dire au cas où $k=1$ et où les angles de diffraction θ_i sont de valeur faible). Pour θ_i proche de zéro, l'expression précédente (4) se simplifie donc en :

$$\theta_i = \frac{\lambda}{pN_i} \quad (5)$$

L'angle de déflexion θ_i peut être a priori modifié par une variation des deux paramètres d'ajustement que sont la longueur d'onde λ et le nombre moyen de pixels par période spatiale N_i :

$$\delta \theta_i = \frac{1}{N_i p} \delta \lambda - \frac{\theta_i}{N_i} \delta N_i \quad (6)$$

A longueur d'onde constante ($\delta \lambda = 0$), on réalise une correction « digitale » :

$$\delta \theta_i = \frac{\theta_i}{N_i} \delta N_i \quad (5)$$

La plus petite variation physique entre deux réseaux 2 différents correspond à un pixel supplémentaire par période spatiale, soit à $\delta N_i = 1$ dans l'équation (5) ci-dessus.

Cependant, pour permettre un réglage plus fin de l'angle de diffraction associé à une longueur d'onde λ donnée, les inventeurs de la présente demande ont envisagé d'utiliser des perturbations de la forme complète du motif du réseau, afin d'obtenir des variations δN_i inférieures au pixel.

Un exemple de réalisation d'une telle perturbation est illustré par la figure 3, qui présente deux motifs presque identiques G_1 et G_2 du réseau 2, dans une direction donnée.

Le motif G_1 de l'élément diffractif 2 est caractérisé par un nombre de pixels N_i par période dans la direction i , ce qui produit un angle de diffraction $\theta_i = \frac{\lambda}{N_i p}$, pour une longueur d'onde λ donnée. (On rappelle que p désigne la taille d'un pixel de l'élément diffractif 2).

Le motif G_2 de l'élément diffractif 2 est produit par la séquence périodique de sN_i+1 pixels dans la direction i , comprenant $s-1$ sous-périodes contenant N_i pixels suivies par une période contenant N_i+1 pixels. Le nombre moyen de pixels par période pour G_2 est donc égal à $\frac{N_i(s-1)+(N_i+1)}{s} = N_i + \frac{1}{s}$, ce qui produit un angle de diffraction $\theta_i^* = \frac{\lambda}{(N_i + \frac{1}{s})p}$, pour une longueur d'onde λ donnée.

La différence angulaire correspondante entre les deux motifs G_1 et G_2 du réseau diffractif 2 est donc égale à :

$$\theta(G_1) - \theta(G_2) = \frac{\theta_i}{sN_i+1} \quad (6)$$

L'augmentation de la résolution angulaire du dispositif de la figure 1, induite par le passage du motif G_1 au motif G_2 , comparée à la valeur donnée par la relation (5) avec $\delta N_i = 1$, peut être mesurée par le rapport suivant :

$$R = \frac{\delta \theta_i}{\theta(G_1) - \theta(G_2)} = s + \frac{1}{N_i} \approx s \quad (7)$$

La plus petite valeur du facteur de sur-échantillonnage s associé à une perturbation de la forme complète du motif G_1 du réseau 2 est $s_{\min} = 2$. La valeur de s est en outre majorée par le nombre N_{pix} de pixels de l'élément diffractif mince programmable 2 par dimension à $s_{\max} = N_{\text{pix}}/2N_i$.

Pour des valeurs caractéristiques de $N_{\text{pix}} = 1000$ et $N_i = 10$, le gain en résolution angulaire, induit par le passage du motif G_1 au motif G_2 est $R = 50$.

Selon le procédé décrit ci-dessus, on peut donc déplacer, dans toutes les directions, le faisceau lumineux de manière infinitésimale devant la fibre 7, par simple configuration du motif de l'élément diffractif programmable 2, par

exemple par chargement des pseudo-périodes correspondant au motif G_2 dans l'hologramme numérique programmable 2. La fibre optique de sortie 7 devient alors un filtre de bande, centré sur une longueur d'onde λ_2 . Cette longueur d'onde λ_2 est décalée par rapport à la longueur d'onde centrale λ_1 correspondante, obtenue précédemment avec le motif G_1 .

Pour évaluer le décalage en longueur d'onde de la bande passante du filtre 7, induit par le passage du motif G_1 au motif G_2 , il suffit de remarquer que l'angle de diffraction θ_i doit être conservé lors du passage de G_1 à G_2 (la fibre optique adressée reste la fibre de sortie référencée 7 lors de la configuration de l'hologramme 2), ce qui conduit à :

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1}{sN_i} \quad (8)$$

Les résultats de la figure 4 illustrent ce décalage en longueur d'onde induit par le passage d'un motif G_1 caractérisé par $N_i = 14$ à un motif G_2 caractérisé par $s = 10$. Pour un filtre de bande spectrale 7 centré, avant reconfiguration de l'hologramme, sur une longueur d'onde $\lambda_1 = 1548$ nm, on obtient donc un décalage en longueur d'onde égal à $|\lambda_2 - \lambda_1| = 1548 \text{ nm}/140 = 11$ nm. Après reconfiguration du motif de l'hologramme, la fibre optique de sortie 7 constitue donc un filtre de bande centré sur une longueur d'onde $\lambda_2 = 1537$ nm.

Si l'on utilise une barrette de fibres mono-modes pour concevoir la matrice 4 de fibres optiques de sortie, on réalise ainsi une batterie de filtres accordables. La sélectivité spectrale de chacun de ces filtres accordables est fonction du désaxement de la fibre optique de sortie correspondante par rapport à l'axe optique du système.

En effet, en exploitant la dépendance chromatique de l'élément diffractif 2 vis-à-vis du positionnement des fibres optiques de sortie de la matrice 4 dans le plan d'imagerie, on peut exprimer la sélectivité spectrale de chacun des filtres accordables en fonction du nombre de pixels par période spatiale de l'élément diffractif 2. Le mode imagé par l'élément diffractif 2 étant centré dans le plan d'imagerie à une distance X_i de l'axe optique, correspondant à la distance du centre la fibre optique de sortie 7 à l'axe optique du dispositif 1, on a :

$$\tan(\theta_i) = X_i/f \quad (9)$$

En régime paraxial $\tan(\theta_i) = \theta_i$, et pour une configuration donnée de l'élément diffractif 2, $\delta N_i = 0$. Par dérivation de l'équation (9), on obtient :

$$\delta X_i = kf/(N_i p) \delta \lambda \quad (10)$$

5 où p est la taille d'un pixel de l'hologramme 2.

Si l'on fixe les pertes, dues au décalage en longueur d'onde, à une valeur μ et pour une valeur de couplage donnée en dB, on a :

$$\delta \lambda = \frac{0.96 N_i p w}{k f} \sqrt{-\mu} \quad (11)$$

10 où w désigne le "waist" (ou en français le col) du mode de la fibre optique de sortie 7 considérée.

La bande passante d'une fibre de sortie est donc donnée par $\delta \lambda(\mu = -3\text{dB}) = 1.66 N_i p w / k f$. On remarque donc que plus le pas du réseau 2 est petit, et plus le réseau est dispersif et la bande passante du filtre accordable, réduite. Pour des valeurs de $p = 10^{-5}$ m, $w = 5 \cdot 10^{-6}$, $f = 40,5 \cdot 10^{-3}$ m et $N_i = 2$, on obtient : $\delta \lambda = 4.1$ nm. Cette valeur peut facilement être réduite en prenant les ordres supérieurs (c'est-à-dire pour $k > 1$) mais en contrepartie, la pénalité en énergie sera importante.

La courbe de la figure 5 illustre l'évolution de la bande passante d'un filtre accordable de l'invention, en fonction du nombre de pixels par période spatiale de l'élément diffractif programmable 2.

20 Le gabarit du filtre peut être ajusté (en termes d'uniformité et de pente), en superposant une fonction de fenêtrage sur le réseau affiché sur l'élément diffractif programmable. Une telle méthode a notamment été proposée, dans le cas d'éléments fixes, par J. P. Laude et S. Louis dans "A new Method for Broadening and Flattening the Spectral Shape of Transmission Channels of WDM Multiplexers and Routers", OECC'98, Techn. Digest, pp. 522-532, Chiba, Japon, Juillet 1998 (en français "une nouvelle méthode pour élargir et aplanir la réponse spectrale des canaux de transmission des multiplexeurs et des routeurs WDM").

30 Le choix des fibres optiques de sortie de la matrice 4 est un paramètre important de la conception du dispositif 1 de l'invention. En effet, comme exposé

ci-dessus, ces fibres optiques jouent le rôle de filtres spectraux, dont la largeur de la bande passante est notamment fonction de la taille du cœur de la fibre.

L'utilisation, dans la matrice 4, de fibres monomodes lentillées du type de celles décrites dans le document de brevet FR 2 752 623, ayant pour titre "Procédé
5 de fabrication d'un dispositif de couplage optique collectif et dispositif obtenu par un tel procédé", permet en outre de réaliser, selon la technique de l'invention, des batteries de filtres très variées. En effet, on peut par exemple construire des filtres spectraux ayant des bandes passantes comprises entre 100 nm et 2 nm, tout en conservant des angles de déflexion du faisceau sur l'élément diffractif 2 faibles
10 (typiquement inférieurs à 3°), dont la valeur est principalement limitée par la résolution de l'hologramme numérique programmable 2 utilisé.

On rappelle que ces fibres optiques sont constituées de fibres monomodes classiques, à l'extrémité desquelles on rapporte, par assemblage et fracture, un tronçon de fibre à gradient d'indice, et éventuellement un tronçon de fibre en
15 silice, afin de réaliser une fibre optique monomode à cœur étendu.

Ces fibres optiques présentent l'avantage d'autoriser des diamètres de modes allant de moins de 5 μm à plusieurs dizaines de microns, tout en conservant les propriétés d'une fibre mono-mode.

Ces fibres optiques de sortie peuvent être disposées, au sein de la matrice
20 4, conformément au schéma de la figure 6.

Sur ce schéma, la matrice 4 comprend 7 fibres optiques de sortie 12, qui sont réparties sur deux cercles d'isochromatisme respectivement référencés 10 et 11. Toutes les fibres optiques 12 situées sur un même cercle d'isochromatisme sont situées à la même distance de l'axe optique 8 du système : elles constituent
25 donc des filtres accordables de même bande spectrale.

On présente désormais, en relation avec la figure 7, un exemple d'application de la technique de filtrage décrite précédemment en relation avec les figures 1 à 6, à la réalisation d'un dispositif de routage.

Le dispositif 1 peut être complété, dans une variante de l'invention, pour
30 réaliser, outre la fonction de filtrage décrite précédemment, une fonction de

rou tage permettant la réalisation de filtres sélecteurs-routeurs de bandes spectrales. Cette variante de réalisation exploite avantageusement la propriété des hologrammes numériques de pouvoir adresser plusieurs fibres simultanément.

Par souci de simplification, on s'attachera dans la suite à décrire un
5 exemple simple de réalisation, dans lequel on cherche à effectuer une permutation de bande spectrale entre deux fibres de sortie du dispositif 1. Ainsi, dans une première configuration donnée de l'élément diffractif 2, une fibre 71 constitue un filtre de bande spectrale centré sur une longueur d'onde λ_1 , et une seconde fibre 72 constitue un filtre de bande spectrale centré sur une longueur d'onde λ_2 . On
10 cherche à configurer le dispositif 1, de façon qu'il route la bande spectrale de longueur d'onde λ_1 vers la seconde fibre optique de sortie référencée 72, et la bande spectrale centrée sur λ_2 vers la première fibre référencée 71.

Les fonctionnalités du dispositif de routage ne sont bien sûr pas limitées à la simple permutation de deux bandes spectrales, mais sont étendues à toutes les
15 opérations de routage qui peuvent être réalisées étant donnés un signal incident à multiples longueurs d'ondes λ_i , et une pluralité de fibres optiques de sortie.

Le principe décrit ci-dessous en relation avec la figure 7 peut donc être généralisé à plusieurs fibres, sous réserve de pertes de puissance supplémentaires induites par le codage holographique.

20 On considère le motif R1 du réseau diffractif 2, qui permet, selon la technique décrite précédemment en relation avec la figure 3, de commuter vers la fibre référencée 71 une bande spectrale centrée sur la longueur d'onde λ_1 .

On considère également le motif R2 du réseau diffractif 2, qui permet de commuter vers la fibre référencée 72 une bande spectrale centrée sur la longueur
25 d'onde λ_2 où $\lambda_1 < \lambda_2$.

On peut alors configurer l'hologramme numérique programmable 2, de façon à ce qu'il corresponde à la combinaison H de ces deux motifs de réseaux R1 et R2, et qu'il réalise donc un routage de la bande λ_1 vers la première fibre référencée 71 et de la bande λ_2 vers la deuxième fibre référencée 72. Une telle
30 combinaison correspond à l'addition des deux coefficients de réflexion des

réseaux R1 et R2, $\hat{R}=\hat{R}1+\hat{R}2$, accompagnée d'un codage holographique C approprié, opération symbolisée par $H=C\hat{R}$. Cette opération est équivalente à une opération de « bridging » à la différence que les bandes spectrales transmises sur chaque fibre sont différentes.

5 Lorsque les fibres référencées 71 et 72 sont situées sur un cercle d'isochromatisme (par exemple le cercle référencé 10 de la figure 6) l'opération de routage s'effectue alors à bande passante constante.

On cherche désormais à permuter ces deux bandes spectrales λ_1 et λ_2 . Pour ce faire, on utilise la méthode des perturbations des motifs du réseau 2 décrite
10 précédemment avec la figure 3.

En d'autres termes, on modifie légèrement le motif R1 (en utilisant une pseudo-période associée R1') de façon à déplacer le spectre vers la gauche (c'est-à-dire dans le sens des longueurs d'onde décroissantes), selon la flèche référencée 73 de la figure 7. Ainsi, on décale en longueur d'onde la bande spectrale incidente
15 sur la fibre référencée 71, de façon qu'elle soit désormais centrée sur λ_2 . De même, on modifie légèrement le motif R2 (en utilisant une pseudo-période associée R2'), de façon à déplacer le spectre vers la droite (c'est-à-dire dans le sens des longueurs d'onde croissantes), selon la flèche référencée 74 de la figure 7.

20 On peut ensuite former l'hologramme H', résultant de la composition de ces deux pseudo-périodes R1' et R2', qui donne le résultat escompté, ainsi qu'illustré par la figure 7 : la bande spectrale centrée sur λ_2 est maintenant transmise vers la fibre optique référencée 71, et la bande spectrale centrée sur λ_1 est transmise vers la fibre optique référencée 72. On effectue ainsi une opération
25 de routage de longueur d'onde en changeant simplement la configuration de l'hologramme programmable 2 de H vers H'.

Comme indiqué précédemment, cette opération peut bien sûr être étendue au cas d'une pluralité de fibres optiques de sortie.

30 Les figures 8a et 8b présentent les courbes représentatives des pertes dans les fibres optiques de sortie 71 et 72, en fonction de la longueur d'onde,

respectivement pour les configurations d'hologramme H et H'. Sur la figure 8a, la bande passante de la fibre référencée 71 est centrée sur $\lambda_1 = 1530$ nm, et la bande passante de la fibre référencée 72 est centrée sur $\lambda_2 = 1550$ nm environ. Après reconfiguration de l'hologramme 2 selon le motif H', la fibre référencée 72
5 présente une bande spectrale centrée sur $\lambda_1 = 1530$ nm, et la fibre référencée 71, une bande spectrale centrée sur $\lambda_2 = 1550$ nm, ainsi qu'illustré par la figure 8b.

On présente désormais, en relation avec les figures 9 à 11, des exemples d'application de la technique de filtrage en bande spectrale accordable de l'invention à la réalisation d'un dispositif de compensation de dispersion
10 chromatique.

Dans un tel dispositif de compensation de dispersion chromatique de l'invention, on connecte les fibres optiques de sortie de la matrice 4 du dispositif de filtrage 1, opérant comme filtres de bandes spectrales, à des tronçons de fibres spéciales à compensation chromatique négative. Ces tronçons de fibres peuvent
15 présenter des caractéristiques différentes en termes de pentes ou de bandes spectrales. La valeur de la compensation chromatique induite par de tels tronçons de fibre est déterminée par leur longueur, ainsi qu'exposé dans l'article de M. Hirano et al. intitulé "Dispersion compensating fiber over 140 nm bandwidth" (en français "Fibre de compensation de dispersion de bande passante supérieure à
20 140 nm"), ECOC Octobre 2001.

Le choix de la fibre optique de compensation et de sa longueur sont conditionnés par le facteur de qualité Q que l'on cherche à obtenir, défini par l'équation suivante :
$$Q = D/\alpha \quad (11)$$

où D est la dispersion (en ps/nm/km) et α l'atténuation (en dB/km et fonction de
25 λ) du signal véhiculé par la fibre de compensation.

Les figures 9 et 10 illustrent une première variante de réalisation d'un dispositif de compensation de dispersion chromatique, dans lequel les tronçons de fibre de compensation 20, 21 et 22 sont utilisés comme miroirs.

En effet, le dispositif de filtrage 1 de l'invention étant conçu selon un montage de type 4-f, on obtient une imagerie parfaite dans le plan de la matrice 4
30

de fibres de sortie (qui coïncide avec le plan du "waist", ou col, w_0), et les fibres peuvent être alors utilisées comme miroir sans perte d'information.

Après un parcours dans la fibre de compensation de dispersion 20 par exemple, et réflexion en extrémité 23 de celle-ci, le signal est rétro-propagé et suit le parcours optique inverse pour se recombinaison dans la fibre de sortie 24 avec les signaux ayant suivis d'autres parcours, c'est-à-dire emprunté d'autres tronçons 21 ou 22 de fibre à compensation de dispersion.

Une telle fibre de sortie 24 correspond à la fibre d'entrée référencée 3 du dispositif de la figure 1.

Le principe décrit ci-dessus permet la réalisation d'une compensation variable adaptative. Le dispositif de la figure 9 présente l'avantage de recombinaison automatiquement les signaux après compensation dans les tronçons de fibres 20 à 22, sans qu'il soit nécessaire de mettre en œuvre un dispositif supplémentaire de recombinaison.

Dans la variante de réalisation de la figure 9, on utilise des filtres de même largeur spectrale, en sélectionnant des fibres optiques de sortie 30, 31 et 32 situées sur le même cercle d'isochromatisme 11. Dans ce dispositif, les paramètres modulables correspondent au choix de la bande spectrale, qui est déterminée par la configuration de l'hologramme 2 utilisée, et de la valeur de la compensation, déterminée par le choix d'une fibre optique 30, 31 ou 32 dans le plan de sortie.

Dans la variante de réalisation de la figure 10, en revanche, on travaille sur deux bandes spectrales différentes, en sélectionnant deux isochromes référencés 10 et 11 distincts. Ainsi, le signal incident est transféré vers deux fibres optiques de sortie référencées 33 et 34, respectivement situées sur les cercles d'isochromatisme 10 et 11. Chacune de ces fibres 33, 34 est connectée à un tronçon de fibre à compensation de dispersion 37, 36, dont l'extrémité est recouverte d'un traitement réfléchissant 23, afin que ces tronçons de fibre 36, 37 jouent le rôle de miroir. Comme pour le montage de la figure 9, les signaux subissent une rétro-propagation dans les fibres 33 et 34, puis sont recombinaison dans la fibre référencée 24.

La figure 11 présente une troisième variante de réalisation du dispositif de compensation de dispersion chromatique de l'invention, qui permet d'éviter la rétro-propagation du signal dans les fibres optiques de sortie de la matrice 4, et donc le traitement des tronçons de fibres à compensation de dispersion en leur

5 extrémité.

Selon cette variante, un tronçon de fibre à compensation de dispersion 42 est connecté, par chacune de ses extrémités, à deux fibres optiques de sortie référencées 40 et 41 situées sur un même cercle d'isochromatisme 11. Ces deux fibres optiques 40 et 41, diamétralement opposées sur le cercle d'isochromatisme

10 11, correspondent à deux ordres de diffraction symétriques de l'hologramme numérique programmable 2 du dispositif 1 de l'invention.

Une telle configuration correspond pour exemple au cas d'un système holographique à niveau de phase binaire. Le montage de la figure 11 nécessite un bon équilibrage des 2 chemins optiques, de la fibre d'entrée 24 à la fibre optique de sortie 41 d'une part, et de la fibre optique de sortie 40 à la fibre d'entrée 24

15 d'autre part, en sens inverse. Toutefois l'erreur induite par un déséquilibre de ces deux chemins optiques reste faible par rapport à la compensation de dispersion chromatique apportée par la fibre référencée 42.

REVENDICATIONS

1. Dispositif optique de filtrage en longueur d'onde comprenant au moins une fibre optique d'entrée et au moins une fibre optique de sortie, caractérisé en ce qu'il comprend :
 - 5 - des moyens de transfert, vers au moins une desdites fibres optiques de sortie, d'au moins une bande spectrale d'au moins un signal à multiples longueurs d'onde incident par au moins une desdites fibres optiques d'entrée,
lesdits moyens de transfert mettant en œuvre au moins un élément
10 diffractif programmable situé dans un plan intermédiaire entre la ou lesdites fibres optiques d'entrée et la ou lesdites fibres optiques de sortie,
- et des moyens de programmation permettant de configurer ledit élément diffractif programmable de façon qu'il présente une période spatiale P dans ladite au moins une direction, de sorte qu'une bande spectrale centrée sur
15 une longueur d'onde λ_i donnée soit diffractée dans ladite au moins une direction par ledit élément diffractif programmable selon un angle θ_i prédéterminé tel que $\sin \theta_i = \frac{k \lambda_i}{P}$, où k est un nombre entier,
lesdits moyens de programmation apportant à ladite période spatiale P une
perturbation équivalente à une variation inférieure à la taille d'un pixel
20 dudit élément diffractif programmable.
2. Dispositif optique selon la revendication 1, caractérisé en ce que lesdits moyens de programmation permettent de configurer ledit élément diffractif programmable de façon qu'il présente une période spatiale P comprenant :
 - au moins une sous-période comprenant N_1 pixels ;
 - 25 - au moins une sous-période comprenant N_2 pixels,où N_1 et N_2 sont deux nombres entiers distincts.
3. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé en ce qu'il comprend une matrice d'au moins deux fibres optiques de sortie constituant chacune un filtre spectral.

4. Dispositif optique selon la revendication 3, caractérisé en ce que la localisation dans l'espace desdites fibres optiques de sortie est prédéterminée en fonction d'une fonction de filtrage à réaliser.
5. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 3 et 4, caractérisé en ce que la taille du cœur desdites fibres optiques de sortie est prédéterminée en fonction d'une fonction de filtrage à réaliser.
6. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 3 à 5, caractérisé en ce que lesdites fibres optiques de sortie sont situées sur au moins un cercle d'isochromatisme.
- 10 7. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que ledit élément diffractif est un hologramme numérique programmable.
8. Dispositif optique selon la revendication 7, caractérisé en ce que ledit hologramme numérique programmable est affiché sur un modulateur spatial de lumière à niveaux de modulation d'amplitude ou de phase, lesdits niveaux étant continus ou quantifiés.
- 15 9. Dispositif optique selon la revendication 8, caractérisé en ce que ledit modulateur spatial de lumière est associé à au moins un élément diffractif fixe.
10. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'il comprend une lentille collimatrice,
- 20 en ce que ledit élément diffractif agit en réflexion et est situé dans le plan focal image de ladite lentille collimatrice,
- et en ce que lesdites au moins une fibre optique d'entrée et de sortie sont situées dans le plan focal objet de ladite lentille collimatrice,
- 25 de façon à former un montage d'optique en espace libre de type 4-f replié.
11. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7 et 9, caractérisé en ce qu'il comprend deux lentilles collimatrices, appelées respectivement première et deuxième lentilles,
- en ce que ledit élément diffractif est situé dans le plan focal image de ladite première lentille et dans le plan focal objet de ladite deuxième lentille,
- 30

en ce que ladite au moins une fibre optique d'entrée est située dans le plan focal
objet de ladite première lentille,
et en ce que ladite au moins une fibre optique de sortie est située dans le plan
focal image de ladite deuxième lentille,

5 de façon à former un montage d'optique en espace libre de type 4-f.

12. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 3 à 11,
caractérisé en ce que chacune desdites fibres de ladite matrice de fibres optiques
de sortie est caractérisée par sa position par rapport à l'axe optique dudit dispositif,
de façon que ledit dispositif constitue une batterie d'au moins deux filtres

10 accordables,

et en ce qu'il comprend des moyens d'ajustement holographiques de la sélectivité
spectrale de chacun desdits filtres, en fonction de ladite position par rapport à l'axe
optique de ladite fibre optique de sortie correspondante.

13. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 12,
15 caractérisé en ce que lesdites fibres optiques de sortie sont des fibres monomodes.

14. Dispositif optique selon la revendication 13, caractérisé en ce que au
moins une desdites fibres monomodes présente au moins une lentille en son
extrémité, de façon à former une fibre monomode lentillée.

15. Dispositif optique selon la revendication 14, caractérisé en ce que ladite
20 lentille comprend au moins un tronçon de fibre à gradient d'indice rapporté par
assemblage et fracture.

16. Dispositif optique selon la revendication 15, caractérisé en ce que ladite
lentille comprend en outre un tronçon de fibre en silice entre ladite fibre
monomode et ledit tronçon de fibre à gradient d'indice rapporté par assemblage et
25 fracture.

17. Dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 16,
caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de réglage d'un gabarit de filtrage
appliqué à au moins une desdites longueurs d'onde.

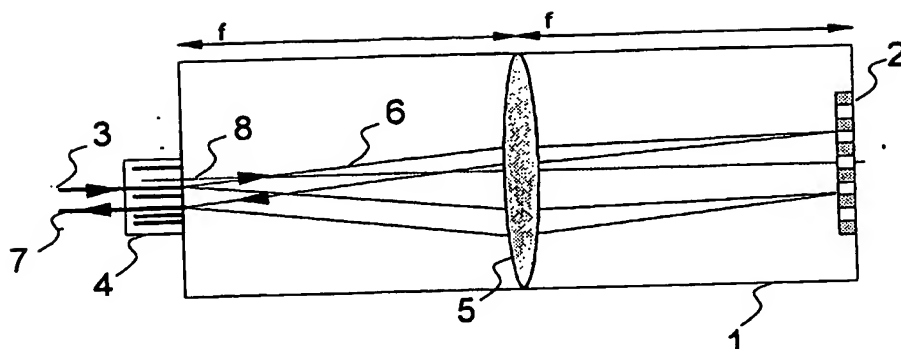
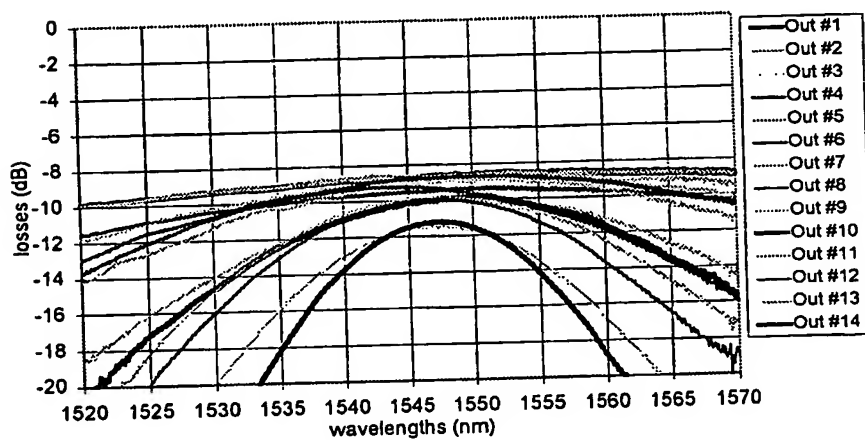
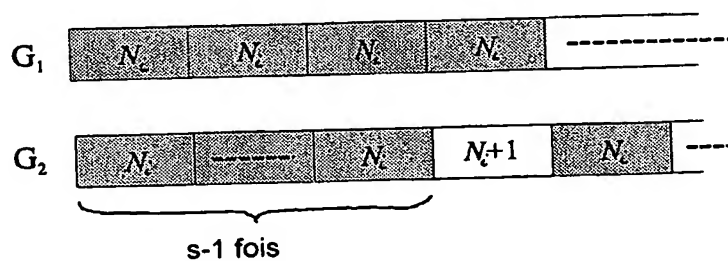
18. Dispositif optique selon la revendication 17, caractérisé en ce que ledit
30 gabarit de filtrage est superposé audit élément diffractif programmable.

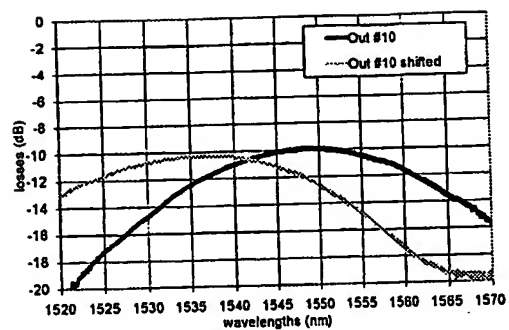
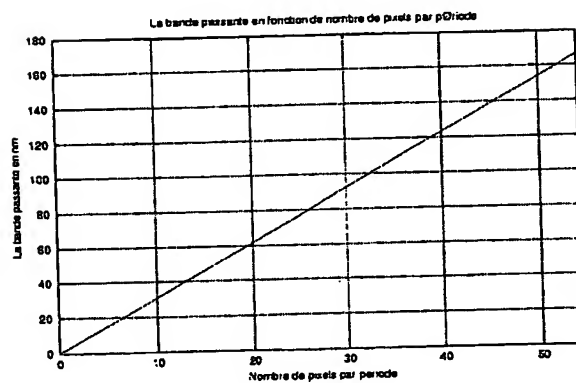
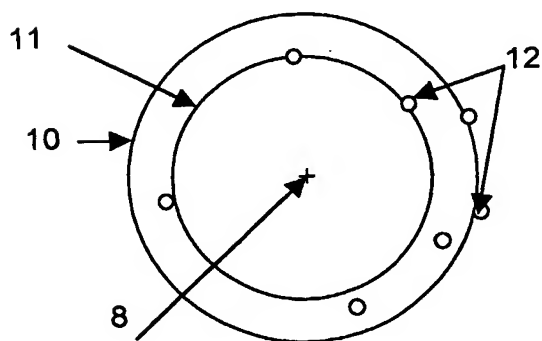
19. Dispositif optique selon la revendication 17, caractérisé en ce que ledit gabarit de filtrage est inclus dans ledit élément diffractif programmable.
20. Routeur de bandes spectrales caractérisé en ce qu'il comprend au moins un dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 19, le ou lesdits
5 dispositifs comprenant au moins deux fibres optiques de sortie.
21. Routeur de bandes spectrales selon la revendication 20, caractérisé en ce que ledit élément diffractif est configurable dynamiquement de façon à router au moins deux bandes spectrales distinctes d'au moins un signal incident, respectivement vers des fibres optiques de sortie F_j distinctes.
- 10 22. Routeur de bandes spectrales selon la revendication 20, caractérisé en ce que lesdits moyens de programmation permettent de configurer ledit élément diffractif programmable, de façon que ledit élément diffractif programmable présente, dans ladite au moins une direction, une période spatiale P correspondant à la combinaison d'une pluralité de périodes spatiales P_i ,
15 où chacune desdites périodes spatiales P_i est telle que, lorsque ledit élément diffractif programmable présente ladite période spatiale P_i , une bande spectrale centrée sur λ_i est transférée vers ladite fibre optique de sortie F_j .
23. Dispositif de compensation de dispersion chromatique, caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif optique selon l'une quelconque des revendications 1 à
20 19.
24. Dispositif de compensation de dispersion chromatique selon la revendication 23, caractérisé en ce qu'au moins une desdites fibres optiques de sortie est connectée à au moins un tronçon de fibre à compensation chromatique négative.
- 25 25. Dispositif de compensation de dispersion chromatique selon la revendication 24, caractérisé en ce que lesdits tronçons de fibre à compensation chromatique négative présentent une extrémité réfléchissante.
26. Dispositif de compensation de dispersion chromatique selon l'une quelconque des revendications 23 à 25, caractérisé en ce que lesdites fibres

optiques de sortie sont situées sur au moins deux cercles d'isochromatisme distincts.

27. Dispositif de compensation de dispersion chromatique selon l'une quelconque des revendications 24 et 25, caractérisé en ce que ledit tronçon de
5 fibre optique à compensation chromatique négative est connecté, par une première extrémité, à une première fibre optique de sortie, et, par une deuxième extrémité, à une deuxième fibre optique de sortie.

28. Dispositif de compensation de dispersion chromatique selon la revendication 27, caractérisé en ce que lesdites première et deuxième fibres
10 optiques de sortie sont deux fibres diamétralement opposées d'un cercle d'isochromatisme.

**Figure 1****Figure 2****Figure 3**

**Figure 4****Figure 5****Figure 6**

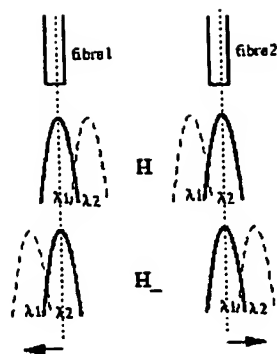


Figure 7

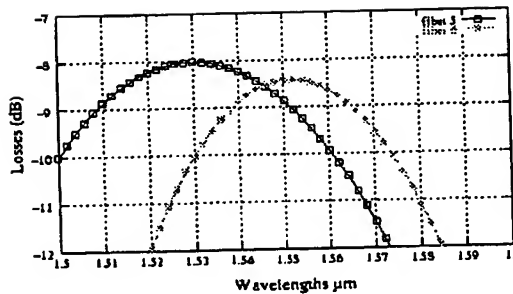


Figure 8a

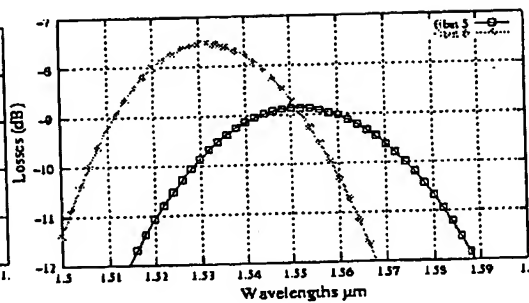


Figure 8b

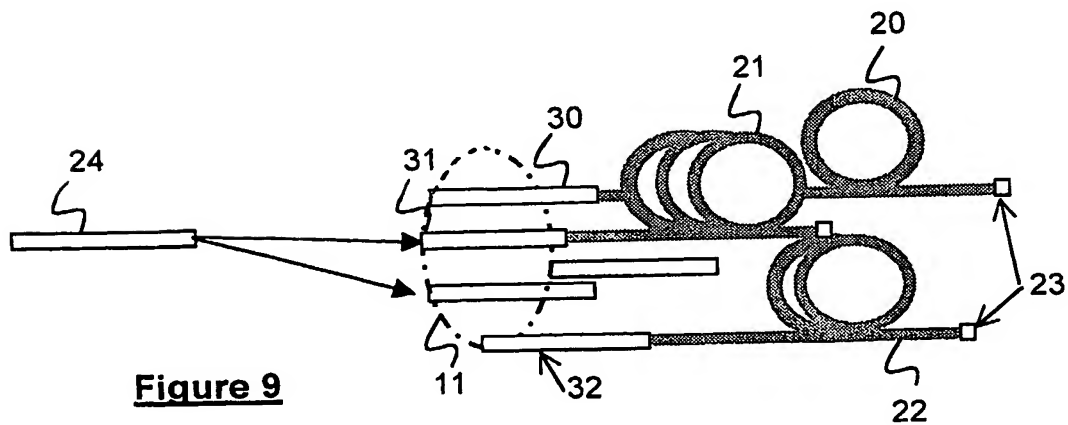


Figure 9

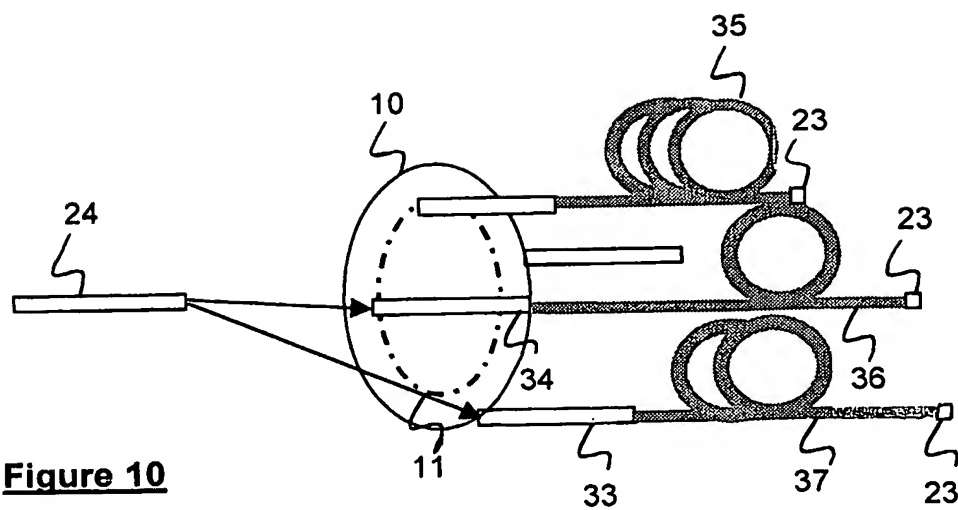


Figure 10

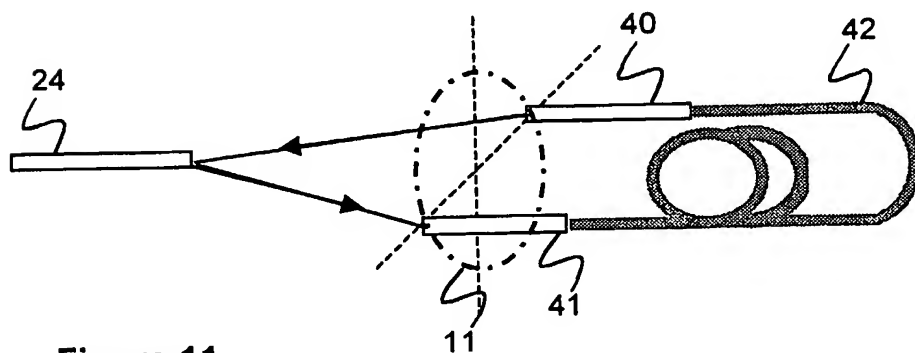


Figure 11